

风电场后评价偏差溯源模型与评分方法研究

夏鼎铭

中国电力工程顾问集团西南电力设计院有限公司 四川 610056

【摘要】：针对风电场后评价中偏差来源难以定量识别、评价标准缺乏的问题，本文提出了基于多源数据对比的偏差溯源模型与后评价评分方法。建立了风资源-转换效率-运行损失三层偏差分解理论框架，提出了基于 SCADA 数据的定量溯源方法，构建了多维度后评价评分模型。研究表明：三层分解模型能够将总偏差定量分解为各环节贡献，基于 SCADA 数据的校核方法可有效消除机舱风速系统偏差，提高对比准确性；提出的评分模型综合考虑风速预测、发电量预测和参数准确性，可客观评价前期评估质量。研究成果可为风电场后评价提供定量化分析工具，为评估方法改进提供科学依据。

【关键词】：风电场后评价；偏差溯源；SCADA 数据；分解模型；评分方法

DOI:10.12417/2705-0998.25.19.041

引言

风电作为清洁可再生能源，在全球能源结构转型中发挥着重要作用。我国风电累计装机容量已超过 400 GW，成为全球最大的风电市场。然而，实践中普遍存在风电场实际发电量与可研预测值偏差较大的问题，偏差范围通常在-30%~+20%之间，部分项目甚至超过 40%^[1]。偏差过大不仅影响投资回报率，也暴露出前期评估工作存在的不足。开展系统的后评价研究，定量识别偏差来源，对于改进评估方法、提高行业整体水平具有重要意义。

国内外学者对风电场后评价开展了相关研究。Staffell 等^[3]对比了欧洲风电场实际发电量与预测值，识别了主要偏差来源；国内学者分析了我国典型风电场的发电量偏差特征和后评价方法^[4,5]。在 SCADA 数据应用方面，学者们利用 SCADA 数据进行机组性能评估和运行评价^[2]。但现有研究仍存在不足：一是缺乏系统的偏差分解理论模型，难以定量识别各环节误差贡献；二是未充分利用 SCADA 数据进行深度分析；三是缺乏标准化的评价指标和评分方法。

针对上述问题，本文基于可研-设计-SCADA 多源数据对比，建立后评价偏差溯源模型与评分方法。主要创新点包括：

(1) 首次提出风资源-转换效率-运行损失三层偏差分解理论模型，可定量计算各环节贡献度；

(2) 建立基于 SCADA 数据的系统化溯源方法体系，解决机舱风速偏差校核等关键技术问题；

(3) 提出标准化的后评价评分模型，为行业提供可参考的评价标准。

1 后评价偏差分解理论与数据对比框架

1.1 后评价数据体系

风电场后评价涉及三类数据源：

(1) 可研阶段数据，包括测风报告（通常 1 年，1~3 个测风塔）、风资源评估结果、发电量预测值；

(2) 设计阶段数据，包括补充测风数据、更新的资源评估、详细设计发电量；

(3) 运行阶段数据，主要来源于 SCADA 系统，包括机舱风速、实际功率、可利用率等，但机舱风速存在系统偏差需校核^[2]。三类数据的对比分析是后评价的核心工作。

1.2 偏差三层分解理论模型

发电量预测偏差的形成是一个多环节累积的过程，本文提出三层分解理论模型，将总偏差分解为风资源评估、能量转换效率、运行损失三个层次。

第一层：风资源评估偏差

风资源评估偏差是指预测风速与实际风速的差异。根据风能公式，风功率与风速的三次方成正比，因此风速偏差对发电量影响显著。定义风资源评估偏差为：

$$\Delta E_{\text{resource}} = E_{\text{pred}} \times \left[\left(\frac{V_{\text{actual}}}{V_{\text{pred}}} \right)^3 - 1 \right]$$

式中， E_{pred} 为基于预测风速计算的理论发电量； V_{actual} 为实际平均风速（从 SCADA 统计）； V_{pred} 为预测平均风速。

该公式表明，风速 1% 的偏差将导致发电量约 3% 的偏差（在小偏差情况下，通过泰勒展开近似）。这说明提高风速预测精度是减少发电量偏差的关键。

第二层：转换效率偏差

转换效率偏差是指在相同风速条件下，实际发电功率与理论功率的差异。该偏差主要来源于：实际功率曲线与额定功率曲线的偏差、尾流效应估计误差、空气密度修正误差等。定义转换效率偏差为：

$$\Delta E_{\text{conversion}} = \int_{\{0\}}^{\{T\}} (P_{\text{actual}} - P_{\text{theoretical}}) dt$$

式中， $P_{\text{actual},t}$ 为时刻 t 的实际发电功率（SCADA 实测）； $P_{\text{theoretical},t}$ 为基于 SCADA 风速和额定功率曲线计算的理论功率； Δt 为时间间隔（通常为 10 分钟）； T 为总时段数。

通过对比实际功率与理论功率，可识别机组性能、尾流模型等环节的偏差。

第三层：运行损失偏差

运行损失偏差是指各类损失系数（电气损失、可利用率等）预测值与实际值的差异。定义运行损失偏差为：

$$\Delta E_{\text{loss}} = E_{\text{gross}} \times [(1 - L_{\text{actual}}) \times A_{\text{actual}} - (1 - L_{\text{pred}}) \times A_{\text{pred}}]$$

式中， E_{gross} 为理论总发电量； L_{actual} 、 L_{pred} 分别为实际和预测的综合损失率（电气损失、环境损失等）； A_{actual} 、 A_{pred} 分别为实际和预测的可利用率。

该层偏差反映了对损失系数估计的准确性，实际可利用率低于预测值是常见的偏差来源。

总偏差分解公式

总发电量偏差可表示为三层偏差之和：

$$\Delta E_{\text{total}} = E_{\text{actual}} - E_{\text{pred}} = \Delta E_{\text{resource}} + \Delta E_{\text{conversion}} + \Delta E_{\text{loss}}$$

为定量各层偏差的相对重要性，定义贡献度为：

$$\text{Contribution}_i = \frac{|\Delta E_i|}{|\Delta E_{\text{resource}}| + |\Delta E_{\text{conversion}}| + |\Delta E_{\text{loss}}|} \times 100\%$$

式中， i 代表三个偏差层次之一。贡献度反映了各环节对总偏差的影响程度，可为针对性改进提供依据。例如，若风资源偏差贡献度超过 60%，说明应重点改进测风和资源评估方法。

表 1 总结了三层偏差分解模型的核心内容。

表 1 三层偏差分解模型框架

偏差层次	风资源评估偏差	转换效率偏差	运行损失偏差
物理含义	预测风速与实际风速差异	实际功率与理论功率差异	损失系数预测与实际差异
主要影响因素	测风时长、空间外推、长期订正	功率曲线、尾流模型、空气密度	可利用率、电气损失、环境损失
典型贡献特征	通常占主导地位	占比较为显著	占比相对较小

1.3 多源数据对比框架

基于三类数据源的特点，本文建立了递进式的对比分析框架。在测风数据层面，对比可研与设计阶段数据可识别年际变化和测量偏差；在风资源评估层面，对比不同阶段评估结果可验证方法改进效果；在发电量预测层面，将预测值与实际值对比并结合三层分解模型，可将总偏差分解到各环节，为定量溯源提供数据基础。

2 基于 SCADA 数据的偏差溯源方法

2.1 SCADA 风速数据的校核问题

机舱风速传感器位于风轮后方，受扰流影响存在系统性偏差，偏差系数通常在 0.85 至 0.95 之间。若不校核直接对比会得出错误结论。本文提出两种校核方法：一是利用测风塔数据建立传递函数进行校核，精度高但需保留测风塔；二是通过自由来流机组的功率曲线反推风速，适用范围广但精度稍低。校核后的 SCADA 风速可用于评估风速预测准确性、识别空间外推误差、验证长期订正方法。表 2 对比了两种方法的特点。

表 2 SCADA 风速校核方法对比

校核方法	测风塔校核法	功率曲线反推法
适用条件	保留测风塔	无测风塔
精度	高	中等
优点	直接、可靠、可追溯	适用范围广、成本低
局限性	需测风塔持续运行	受功率曲线精度影响

2.2 风资源评估偏差的溯源分析

风资源评估偏差涉及空间外推和时间外推两方面。通过 SCADA 数据逐机位对比可识别空间外推误差，如距测风塔越远偏差越大则说明外推方法不足。时间外推采用 MCP 方法将短期测风数据订正到多年平均水平，其基本公式为：

$$V_{\text{long-term}} = V_{\text{measured}} \times \frac{\bar{V}_{\text{ref,multi-year}}}{\bar{V}_{\text{ref,concurrent}}}$$

式中， V_{measured} 为测风站实测风速； $\bar{V}_{\text{ref,multi-year}}$ 为参考站多年平均风速； $\bar{V}_{\text{ref,concurrent}}$ 为参考站与测风站同期平均风速。将订正后风速与 SCADA 统计风速对比可验证方法准确性。由于风速偏差与发电量偏差呈近似立方关系，提升风速预测精度至关重要。

2.3 能量转换与运行损失偏差的溯源分析

通过 SCADA 数据可提取实际功率曲线，与额定功率曲线对比可识别空气密度修正误差、机组性能衰减等问题。尾流效应方面，通过识别自由来流和尾流机组并统计功率差异，可计算实际尾流损失。若实际值显著高于预测值，说明尾流模型低估了尾流效应，需优化机组布局。

在运行损失方面，可利用率和电气损失是关键参数。实际利用率通常在 95%至 96%，低于可研预测的 97%至 98%，偏差源于对设备故障率、电网限电等因素估计不足。通过 SCADA 停机记录可准确统计实际损失水平，为改进预测方法提供依据。

3 后评价评分模型与改进机制

3.1 评分指标体系的构建

本文建立的评分体系遵循全面性、客观性和实用性三原则，包含三个维度：风速预测准确性（权重 35%）、发电量预测准确性（权重 50%）、关键参数准确性（权重 15%）。评分函数采用指数衰减形式，分数随偏差增大而快速下降，符合投资风险特征。综合评分模型为：

$$\text{Score}_{\text{total}} = w_1 \times \text{Score}_{\text{wind}} + w_2 \times \text{Score}_{\text{energy}} + w_3 \times \text{Score}_{\text{param}}$$

$$\text{Score}_{\text{wind}} = 100 \times \exp(-\lambda_1 \cdot |\text{RE}_V|)$$

$$\text{Score}_{\text{energy}} = 100 \times \exp(-\lambda_2 \cdot |\text{RE}_E|)$$

式中， RE_V 、 RE_E 分别为风速和发电量的相对偏差； $w_1 = 0.35$ 、 $w_2 = 0.50$ 、 $w_3 = 0.15$ 为三个维度的权重； λ_1 、 λ_2 为衰减系数，根据实际偏差分布统计确定。通过合理设置衰减系数。该方法将定量偏差转化为直观分数，便于横向对比和纵向追踪。表 3 给出评价等级划分标准。

表 3 后评价评分等级划分

评价等级	优秀	良好	合格	不合格
总分特征	高分	较高分	中等分	低分
发电量偏差特征	偏差很小	偏差较小	偏差中等	偏差较大
质量评价	评估精细，方法得当	总体可靠，局部可改进	基本可用，存在明显不足	方法存在严重问题
投资风险	低	较低	中等	高

3.2 基于偏差溯源的改进策略

通过偏差分解和溯源分析可识别主导因素并提出改进策略。当风资源偏差主导时，应延长测风周期、增加测风点、优化 MCP 订正方法。当转换效率偏差主导时，需采用多种尾流模型对比验证、考虑空气密度修正、优化机组布局、采用功率曲线保证值。当运行损失偏差主导时，应参考实际运维数据预

测可利用率、详细计算电气损失、重视环境因素影响。通过这种改进机制形成评价-溯源-改进的良性循环。表 4 总结了改进策略。

表 4 偏差主导因素与改进策略

主导偏差类型	典型表现	主要原因	改进策略
风资源评估偏差	风速预测误差显著	测风周期短、空 间外推不准	延长测风周期、增 加测风点、优化 MCP 方法
转换效率偏差	实际尾流损失明显 超预测值	尾流模型不准、 布局过密	多模型对比、优化 机组间距、采用功 率曲线保证值
运行损失偏差	可利用率实际值 明显低于预测	故障率估计不 足、环境损失低 估	参考实际运维数 据、详细计算电气 损失、重视环境因 素

4 结论

本文针对风电场后评价中偏差来源难以定量识别、评价标准缺乏的问题，建立了基于多源数据对比的偏差溯源模型与评分方法。主要研究成果包括：

（1）提出三层偏差分解理论模型，明确了发电量总偏差的形成机制和分解路径。风速偏差与发电量偏差之间的立方关系表明，提高风速预测精度对减小发电量偏差具有关键作用。

（2）建立基于 SCADA 数据的偏差溯源方法体系，提出测风塔校核和功率曲线反推两种风速校核方法，可提取实际功率曲线、识别尾流损失、统计可利用率等关键参数，为全面揭示评估不足提供客观依据。

（3）构建多维度后评价评分模型，通过指数衰减评分函数客观反映评估质量与投资风险的对应关系，并基于偏差溯源结果提出针对性改进策略，形成评价-溯源-改进的完整闭环。

本文成果为风电行业提供了系统化的后评价分析工具，对提高风资源评估质量、降低投资风险具有实际应用价值。未来可结合更多实际项目数据完善模型，并探索利用机器学习等新技术建立偏差预测模型，实现从事后评价到事前风险识别的跨越。

参考文献：

[1] 张磊,孙树栋,魏巍.风电场后评价中的发电量偏差归因分析[J].电网技术,2021,45(3):1145-1152.
[2] 陈小前,杨秀媛,肖洋.基于 SCADA 数据的风电场运行状态评估[J].中国电机工程学报,2018,38(12):3567-3575.
[3] Staffell I,Green R.How does wind farm performance decline with age?[J].Renewable Energy,2014,66:775-786.

- [4] 李蓓.风电场的选址与风能资源评估及其后评价[D].北京:华北电力大学,2014.
- [5] Clifton A,Smith A,Fields M.Wind plant preconstruction energy estimates:current practice and opportunities[R].National Renewable Energy Laboratory(NREL),Golden,CO(United States),2016.